



Desarrollo de materiales de construcción a partir de papel reciclado para comunidades de bajos recursos

Development of construction materials from recycled paper for low-income communities

Desenvolvimento de materiais de construção a partir de papel reciclado para comunidades de baixo rendimento

Luis Alberto Alva Reyes ^I

lalva@unca.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0003-2232-6784>

Alex Fabián Díaz Díaz ^{II}

adiazd@unitru.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0003-0403-4630>

Jorge Wilmer Elias Silupu ^{III}

jelias@unca.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-0857-4258>

Correspondencia: lalva@unca.edu.pe

Ciencias de la Educación

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 26 de agosto de 2025 * **Aceptado:** 24 de septiembre de 2025 * **Publicado:** 21 de octubre de 2025

- I. Universidad Nacional Ciro Alegría, Perú.
- II. Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
- III. Universidad Nacional Ciro Alegría, Perú.

Resumen

Este estudio identificó la proporción óptima para fabricar ladrillos con papel bond reciclado destinados a muros no portantes. Se evaluaron cinco mezclas (cemento:arena:papel) en proporciones 1:1:1, 1:1:2, 1:1:3, 1:2:2 y 1:2:3, moldeando bloques cúbicos de 10 cm curados al aire durante 28 días. Luego, se realizaron ensayos de compresión con prensa hidráulica, comparando los resultados con los valores mínimos exigidos por las normas peruanas E.080 y E.070 del Reglamento Nacional de Edificaciones. Se aplicó un análisis estadístico (ANOVA y prueba de Tukey, $p < 0.05$), que reveló diferencias significativas entre las mezclas, destacando la proporción 1:1:1 como la más resistente. Esta superó ampliamente los estándares para adobes, bloques no portantes y unidades portantes (tipo I y II), lo que sugiere su uso en edificaciones de uno a dos pisos en zonas de sismicidad media, representando una opción de construcción sostenible, económica y accesible para comunidades de bajos recursos.

Palabras Clave: Materiales de construcción; papel reciclado; bajos recursos.

Abstract

This study identified the optimal ratio for manufacturing bricks from recycled bond paper for non-load-bearing walls. Five mixtures (cement:sand:paper) were evaluated in ratios of 1:1:1, 1:1:2, 1:1:3, 1:2:2, and 1:2:3, molding 10-cm cubic blocks cured in air for 28 days. Compression tests were then performed using a hydraulic press, comparing the results with the minimum values required by Peruvian standards E.080 and E.070 of the National Building Regulations. Statistical analysis (ANOVA and Tukey test, $p < 0.05$) revealed significant differences between the mixtures, with the 1:1:1 ratio standing out as the strongest. This far exceeded the standards for adobes, non-load-bearing blocks and load-bearing units (type I and II), suggesting its use in one- to two-story buildings in areas of medium seismic activity, representing a sustainable, economical and accessible construction option for low-income communities.

Keywords: Building materials; recycled paper; low-income.

Resumo

Este estudo identificou a proporção ótima para o fabrico de tijolos a partir de papel bond reciclado para paredes não estruturais. Foram avaliadas cinco misturas (cimento:areia:papel) nas proporções de 1:1:1, 1:1:2, 1:1:3, 1:2:2 e 1:2:3, moldando blocos cúbicos de 10 cm curados ao ar durante 28

días. De seguida, foram realizados ensaios de compressão com recurso a uma prensa hidráulica, comparando os resultados com os valores mínimos exigidos pelas normas peruanas E. 080 e E. 070 do Regulamento Nacional de Construção. A análise estatística (ANOVA e teste de Tukey, $p < 0,05$) revelou diferenças significativas entre as misturas, destacando-se a proporção 1:1:1 como a mais forte. Isto excedeu em muito os padrões para adobes, blocos não estruturais e unidades estruturais (tipo I e II), sugerindo a sua utilização em edifícios de um a dois andares em áreas de atividade sísmica média, representando uma opção de construção sustentável, económica e acessível para comunidades de baixo rendimento.

Palavras-chave: Materiais de construção; papel reciclado; baixa renda.

Introducción

A nivel global, los materiales de construcción más utilizados son el concreto (hormigón) y el ladrillo cerámico tradicional. No obstante, en muchos países en desarrollo, estos materiales representan más del 50% de las construcciones y suelen implicar altos costos de producción y mano de obra, además de requerir un tiempo considerable para alcanzar su resistencia de servicio (Cardinale et al., 2021). Adicionalmente, la fabricación de ladrillos convencionales y concreto conlleva la explotación intensa de suelos y el consumo de grandes cantidades de recursos no renovables, lo cual encarece su uso y limita el acceso a vivienda de población de bajos recursos (Qureshi et al., 2021). Frente a esta problemática, se han investigado materiales alternativos elaborados a partir de desechos, buscando soluciones sostenibles en la construcción civil.

Una de estas alternativas es el llamado papercrete o concreto de papel, elaborado a base de papel reciclado mezclado con un aglomerante (cemento u otro) y arena u otro árido fino. El uso de fibras celulósicas de papel como parte de la matriz cementante ha sido explorado desde hace décadas, pero ha cobrado interés renovado en los últimos años por su bajo impacto ambiental y costo reducido (Qureshi et al., 2021). Este material compuesto resulta más liviano que los ladrillos tradicionales y posee propiedades de aislamiento térmico y acústico favorables, manteniendo a la vez resistencias mecánicas adecuadas para emplearse en muros divisorios y viviendas de uno o dos niveles (Cardinale et al., 2021; Qureshi et al., 2021). Al reutilizar el papel de desecho se disminuye la cantidad de residuos en rellenos sanitarios, se reduce la demanda de insumos vírgenes y se abarata el costo final del material, haciéndolo accesible para proyectos de vivienda social (Solahuddin & Yahaya, 2021).

Diversos estudios internacionales han demostrado la viabilidad de construir con ladrillos fabricados a base de papel reciclado, especialmente para muros no estructurales o tabiques interiores. Por ejemplo, investigaciones recientes en Asia y Europa han producido bloques con papel reciclado que alcanzan resistencias a la compresión suficientes para su uso en mampostería no portante (Solahuddin & Yahaya, 2021; Cardinale et al., 2021). No obstante, es importante considerar que las normativas de construcción varían entre países; las cargas y requisitos que debe soportar un muro no portante difieren según los códigos locales. En el Perú, el Reglamento Nacional de Edificaciones establece valores mínimos de resistencia a compresión para distintos tipos de elementos de albañilería (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2016, 2017). Por ello, resulta necesario realizar evaluaciones experimentales bajo las condiciones y criterios de la normativa nacional para determinar la aptitud de estos eco-ladrillos de papel reciclado en nuestro contexto.

En este trabajo se propone la elaboración de ladrillos a base de papel bond reciclado combinado con cemento y arena, con el objetivo de obtener un material de construcción ecológico y económico para muros no portantes. Se plantea identificar la proporción óptima de estos componentes que garantice la resistencia mecánica exigida por la normativa peruana vigente. La hipótesis de la investigación es que existe una dosificación de papel reciclado, cemento y arena que maximiza la resistencia a compresión sin superar el umbral de pérdida significativa de desempeño mecánico por exceso de material celulósico. Estudios previos sugieren que una incorporación moderada de fibra de papel (en torno a 5–10% en peso respecto al cemento) puede incluso aumentar la resistencia de mezclas cementantes, mientras que adiciones mayores tienden a reducirla por la introducción de más vacíos y material menos rígido (Solahuddin & Yahaya, 2021). Con base en ello, se definieron cinco proporciones de mezcla a ensayar. A continuación, se detalla la metodología empleada para la fabricación y ensayo de los ladrillos de papel, seguida de la presentación y discusión de los resultados obtenidos, para finalmente establecer conclusiones y recomendaciones fundamentadas en hallazgos actualizados.

Metodología

Para alcanzar el objetivo planteado, se llevó a cabo una investigación experimental con un diseño completamente aleatorizado, evaluando cinco proporciones distintas de mezcla de cemento, arena y papel reciclado. Las proporciones seleccionadas fueron: 1:1:1, 1:1:2, 1:1:3, 1:2:2 y 1:2:3,

expresadas como relaciones en volumen de cemento : arena : papel bond reciclado. Estas relaciones cubren un rango desde mezclas con contenido equilibrado de los tres componentes (1:1:1) hasta mezclas con mayor proporción de papel respecto del cemento (1:1:3 y 1:2:3). El papel bond utilizado provino de residuos de papel de oficina triturados y remojados, obteniendo una pulpa que luego se mezcló con los demás componentes. La arena empleada fue de tipo fina (procedente de cantera local), y se utilizó cemento Portland tipo I como aglomerante.

Para cada proporción de mezcla se prepararon especímenes cúbicos de 10 cm de lado. Los materiales se mezclaron en seco inicialmente (cemento con arena), incorporando luego el papel bond reciclado previamente humedecido, hasta lograr una masa homogénea. Se añadió la cantidad de agua necesaria para obtener una consistencia moldeable, vertiendo la mezcla en moldes cúbicos metálicos. La compactación se realizó manualmente con varilla, asegurando el llenado completo de los moldes y minimizando la presencia de aire atrapado. Las probetas moldeadas se mantuvieron en reposo por 24 horas y luego se desmoldaron con cuidado para proceder al curado.

El curado de las piezas se efectuó al aire libre bajo techo (curado ambiental), protegiéndolas de la lluvia directa. Las probetas se dejaron secar y endurecer durante 28 días, periodo tras el cual se consideró que las mezclas a base de cemento habrían desarrollado la mayor parte de su resistencia mecánica. Es importante resaltar que, dado el alto contenido de material celulósico, no se empleó curado por inmersión en agua para evitar la degradación o disgregación de las fibras de papel en el interior de los especímenes (esta práctica concuerda con recomendaciones de otros estudios de papercrete en que el secado natural es el método de curado preferido) (Solahuddin & Yahaya, 2021).

Cumplido el tiempo de curado, se procedió al ensayo de compresión uniaxial de los cubos. Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron en una prensa hidráulica de laboratorio, aplicando la carga de forma controlada hasta provocar la falla por fractura de cada espécimen. Se registró la carga máxima soportada (fuerza de rotura) y se calculó la resistencia a la compresión dividiendo dicha carga por el área de la sección transversal del cubo (100 cm²). Para cada mezcla se ensayó un conjunto de probetas (en total 120 ensayos distribuidos equitativamente entre las cinco proporciones y valores de referencia normativos), con el fin de obtener un valor promedio representativo y su desviación estándar.

Adicionalmente, con el propósito de contrastar los resultados experimentales con los requisitos de la normativa vigente, se recopilieron los valores de resistencia a la compresión mínima establecidos

en las normas técnicas peruanas aplicables. En particular, la Norma Técnica E.080 del RNE (MVCS, 2017) especifica una resistencia mínima de $10,2 \text{ kgf/cm}^2$ para unidades de adobe (tierra reforzada), valor que sirve como referencia de comparación dado que el adobe es un material tradicionalmente utilizado en muros no portantes. Por su parte, la Norma Técnica E.070 del RNE (MVCS, 2016) establece, entre otros, los siguientes mínimos: 20 kgf/cm^2 para bloques de concreto en muros no portantes, 50 kgf/cm^2 para unidades de albañilería en muros portantes (incluyendo bloques portantes y ladrillos de arcilla tipo I) y 70 kgf/cm^2 para ladrillos de arcilla tipo II (de mayor resistencia). Estos valores normativos fueron considerados como criterios de desempeño para evaluar si las distintas mezclas de papel reciclado lograban resistencias aptas para su uso estructural en cada categoría.

El análisis de los datos obtenidos se realizó empleando estadística inferencial. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para detectar la existencia de diferencias significativas entre las resistencias promedio de las cinco proporciones de mezcla estudiadas. Adicionalmente, se incluyeron en el ANOVA los valores de resistencia normativa (adobe, bloque no portante, bloque portante/ladrillo tipo I, ladrillo tipo II) como grupos de referencia, asignándoles muestras constantes equivalentes a los valores mínimos exigidos, con el fin de comparar estadísticamente cada grupo experimental contra los estándares. Tras comprobar la significancia global (nivel de confianza 95%), se utilizó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para identificar qué diferencias entre pares de grupos (mezclas o referencias) eran estadísticamente significativas. Todo el procesamiento estadístico se llevó a cabo con ayuda del software IBM SPSS v25.

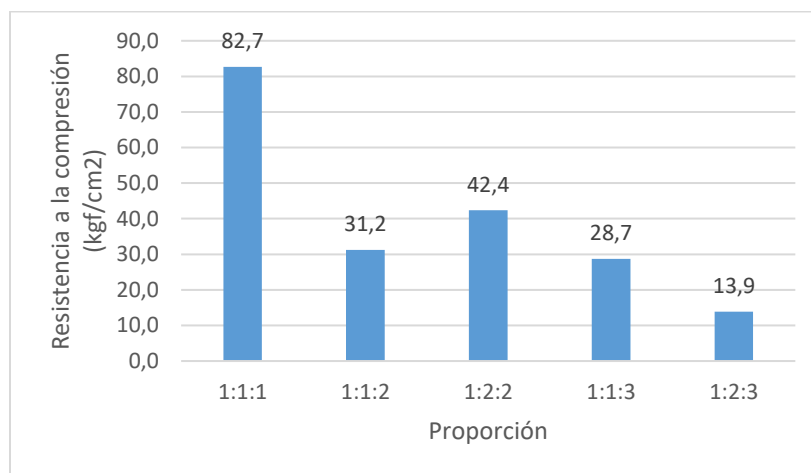
Resultados

Resistencia a la compresión de las distintas proporciones

En la Figura 1 se presentan las resistencias a la compresión promedio correspondientes; a simple vista, se observó que la mezcla 1:1:1 (cemento:arena:papel) alcanzó valores notablemente superiores a los de las demás proporciones. De hecho, la resistencia media de la proporción 1:1:1 fue aproximadamente tres veces mayor que la de las otras mezclas probadas. En contraste, la proporción 1:2:3 (aquella con mayor contenido relativo de papel y menor de cemento) registró la resistencia más baja entre todas las formulaciones.

Figura 1

Resistencia a la compresión vs. proporción de mezcla (cimento:arena:papel)



Nota. Elaboración propia, 2025

Cuantitativamente, la mezcla 1:1:1 alcanzó una resistencia a la compresión promedio de aproximadamente 82,7 kgf/cm², constituyéndose en la de mejor desempeño mecánico. En segundo lugar, las proporciones 1:1:2 y 1:2:2 mostraron resistencias intermedias, del orden de los 31,2 kgf/cm² y 42,4 kgf/cm² respectivamente (con valores específicos dentro de este rango), sin diferencias significativas entre sí según la prueba de Tukey. La mezcla 1:1:3 presentó una resistencia algo menor, en torno a 28,7 kgf/cm², mientras que la mezcla 1:2:3 tuvo la resistencia promedio más reducida, alrededor de 13,9 kgf/cm². La clara superioridad de la proporción 1:1:1 puede atribuirse a su mayor contenido de cemento (componente que aporta la mayor parte de la capacidad resistente una vez endurecido) y adecuado balance con la arena y el papel, resultando en una matriz sólida con suficiente cohesión. Por otro lado, conforme aumenta la fracción de papel en detrimento del cemento (como en las mezclas 1:1:3 y 1:2:3), la resistencia disminuye considerablemente debido a la menor cantidad de material cementante y a la introducción de mayor porosidad asociada a la fibra de papel.

El análisis estadístico confirmó estas observaciones: el ANOVA detectó diferencias altamente significativas entre las resistencias de las distintas proporciones ($F = 115645,325$; $p < 0,0001$). La comparación de Tukey reveló que 1:1:1 es estadísticamente superior (al nivel 0,05) a todas las demás proporciones en términos de resistencia a la compresión. Asimismo, la mezcla 1:2:3 resultó significativamente inferior al resto. Las combinaciones 1:1:2, 1:1:3 y 1:2:2 conformaron un grupo

intermedio, sin diferencias significativas extremas entre algunas de ellas, aunque con una tendencia clara: a mayor contenido de cemento y menor de papel, mayor resistencia alcanzada.

Tabla 1

ANOVA de la Resistencia a la compresión de mezcla (cemento:arena:papel)

	Suma de cuadrados	de gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	40733,587	4	10183,397	115645,325	,000
Dentro de grupos	6,164	70	,088		
Total	40739,751	74			

Nota. Resultados obtenidos en SPSSv25

Tabla 2

Tukey de la Resistencia a la compresión de mezcla (cemento:arena:papel)

		Subconjunto para alfa = 0.05				
Proporción	N	1	2	3	4	5
1:2:3	15	13,8667				
1:1:3	15		28,7133			
1:1:2	15			31,2467		
1:2:2	15				42,3600	
1:1:1	15					82,7000
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 15,000.

Nota. Resultados obtenidos en SPSSv25

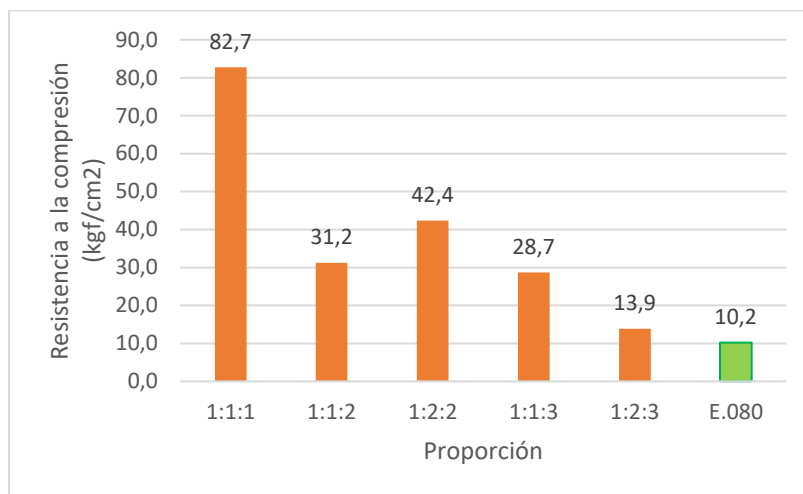
Comparación con requisitos normativos (E.080 y E.070)

Una vez establecidas las resistencias de cada mezcla, se procedió a contrastarlas con los valores mínimos exigidos por las normas técnicas pertinentes. En la Figura 2 se compara la resistencia a la compresión promedio de cada proporción con el valor normativo de 10,2 kgf/cm² estipulado por la norma E.080 (adobes). Todos los ladrillos elaborados con papel reciclado superaron holgadamente este requisito. Incluso la mezcla menos resistente (1:2:3) presentó 13,9 kgf/cm², valor que excede

en aproximadamente 60% la resistencia mínima establecida para adobe. Este resultado indica que, desde el punto de vista estrictamente resistente, cualquiera de las cinco proporciones propuestas produciría unidades con mayor capacidad que el adobe tradicional, lo que supone una ventaja en cuanto a seguridad estructural en comparación con ese material.

Figura 2

Resistencia a la compresión de cada proporción de mezcla vs. valor mínimo para adobe (norma E.080)

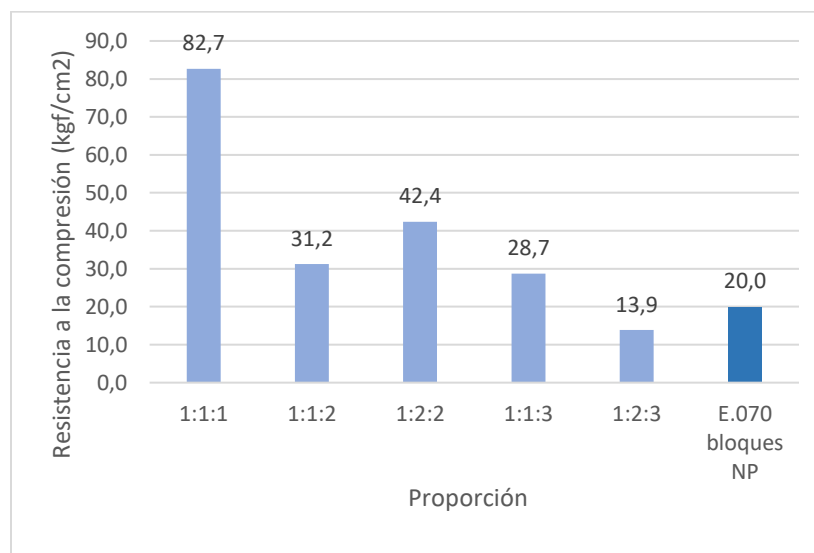


Nota. Elaboración propia, 2025

La Figura 3 muestra la comparación entre las resistencias de las mezclas y el requisito de 20 kgf/cm² que la norma E.070 del RNE establece para bloques de concreto en muros no portantes (es decir, elementos de albañilería que no soportan cargas verticales significativas). Se observa que cuatro de las cinco proporciones cumplen o superan dicho umbral normativo. Específicamente, las mezclas 1:1:1, 1:1:2, 1:1:3 y 1:2:2 lograron resistencias mayores a 20 kgf/cm², mientras que la mezcla 1:2:3, con 13,9 kgf/cm², quedó ligeramente por debajo de ese criterio. Esto implica que, salvo la formulación con mayor contenido de papel (1:2:3), las demás podrían considerarse aptas para fabricar unidades destinadas a muros divisores o tabiques interiores no estructurales, desde la perspectiva de la resistencia a compresión.

Figura 3

Resistencia a la compresión de cada proporción vs. mínimo para bloques no portantes (norma E.070)

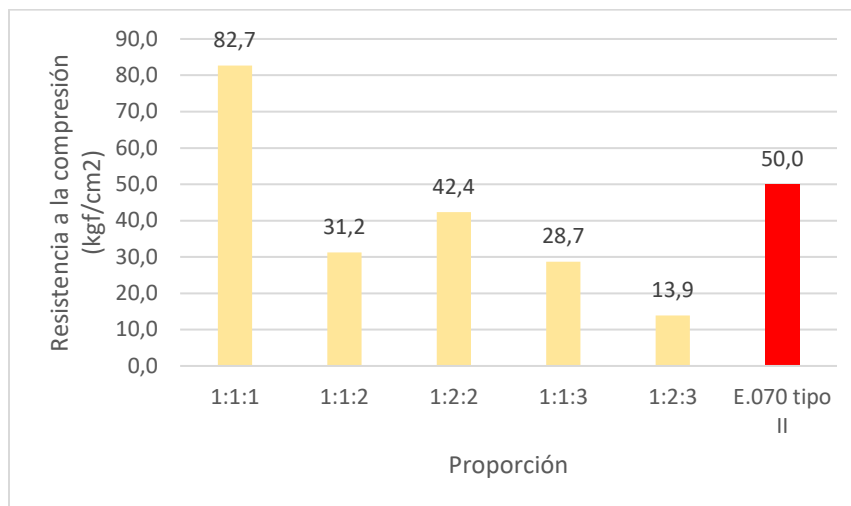


Nota. Elaboración propia, 2025

Por otro lado, la Figura 4 compara las resistencias promedio obtenidas con el valor de 50 kgf/cm² exigido por la E.070 para elementos de albañilería portante (muros que sí soportan carga), categoría que abarca tanto bloques portantes de concreto como ladrillos cerámicos tipo I. En este caso, solo una de las cinco proporciones de papel reciclado logró exceder dicho valor: nuevamente la mezcla 1:1:1, con 82,7 kgf/cm², supera ampliamente los 50 kgf/cm² requeridos. Ninguna de las otras combinaciones alcanzó ese nivel; las más cercanas (1:1:2 y 1:2:2) quedaron por debajo, en el rango de 30–45 kgf/cm². De modo similar, la Figura 5 ilustra la comparación con el criterio más exigente contemplado, 70 kgf/cm² correspondiente a ladrillos cerámicos tipo II (usados en albañilería confinada para edificaciones de hasta 5 pisos en zonas de baja sismicidad, según el RNE). Se evidencia que únicamente la mezcla 1:1:1 supera también este umbral (ya que 82,7 > 70). Las otras proporciones no alcanzan dicha marca.

Figura 4

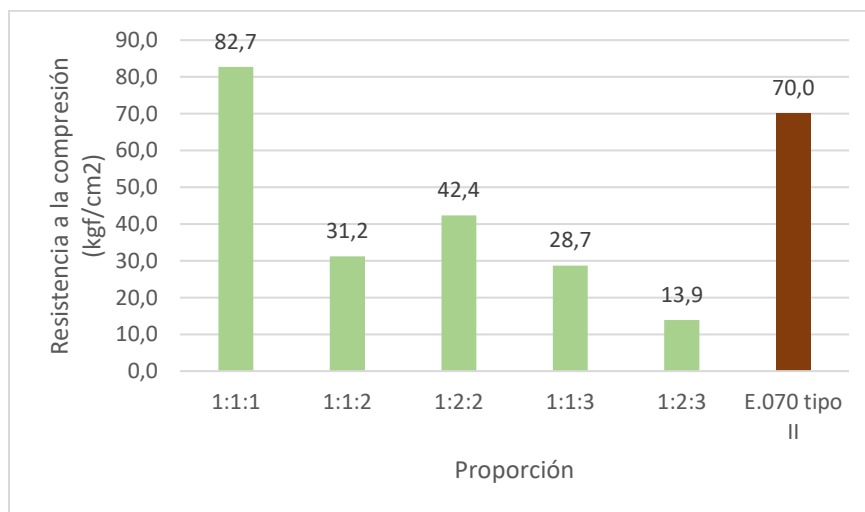
Resistencia a la compresión de cada proporción vs. mínimo para bloques portantes y ladrillos tipo I (norma E.070)



Nota. Elaboración propia, 2025

Figura 5

Resistencia a la compresión de cada proporción vs. mínimo para ladrillos tipo II (norma E.070)



Nota. Elaboración propia, 2025

En síntesis, los resultados muestran que todas las formulaciones producen ladrillos con resistencia suficiente para reemplazar al adobe en muros no portantes, cuatro de ellas cumplen además con la resistencia requerida para bloques de concreto no portantes, y solo la mezcla 1:1:1 alcanza resistencias comparables a las de unidades portantes de alta calidad. Este panorama sugiere que la

incorporación de papel reciclado en la mezcla afecta la resistencia de forma sensible dependiendo de la proporción, existiendo un punto óptimo (1:1:1) a partir del cual mayores contenidos de papel resultan perjudiciales para la capacidad resistente.

Discusión

Los resultados obtenidos evidencian una variación considerable en la resistencia a compresión en función de la proporción de papel reciclado incorporado. La mezcla 1:2:3 (con el porcentaje más alto de papel y menor de cemento) presentó la resistencia más baja (13,9 kgf/cm²), mientras que la mezcla 1:1:1 (con partes iguales de cemento, arena y papel) logró la más alta (82,7 kgf/cm²). Esta tendencia concuerda con hallazgos de otras investigaciones recientes, que reportan que adicionar fibras de papel en pequeñas cantidades puede mejorar o mantener la resistencia del material cementante, pero cantidades excesivas conducen a una disminución drástica de la resistencia mecánica (Solahuddin & Yahaya, 2021). En concreto, Solahuddin y Yahaya (2021) encontraron que en concretos con papel triturado, las resistencias a compresión aumentaban hasta un contenido óptimo de papel cercano al 10% en peso de la mezcla, reduciéndose al exceder dicho porcentaje. En este estudio, las mezclas 1:1:1 y 1:1:2 contienen fracciones de papel relativamente moderadas (33% y 50% en volumen, respectivamente, equivalentes a una fracción en peso menor al 10% del total, dado el bajo peso específico del papel), lo que explica que aún mantengan resistencias apreciables. Por el contrario, en 1:1:3 y 1:2:3 la proporción de papel es muy elevada, generando una matriz menos densa y con más vacíos, lo que justifica sus bajas resistencias.

Es ilustrativo comparar estos resultados con los de estudios previos que exploraron mezclas similares. Por ejemplo, Moreno y Ponce (2017) elaboraron unidades de albañilería ecológica utilizando cemento y papel reciclado sin agregado de arena, en una proporción aproximada de 1:3:1,5 (cemento:papel:agua). La resistencia a compresión obtenida en aquel caso fue apenas de 3,3 kgf/cm², valor muy inferior a cualquiera de nuestras mezclas. Si bien no disponemos de un estudio posterior a 2020 exactamente equivalente, este resultado destaca el rol crucial de la arena como refuerzo particulado en la mezcla: la ausencia de un árido fino lleva a una drástica reducción de la capacidad resistente debido a la falta de esqueleto granular en la matriz. En nuestro trabajo, al incorporar arena en todas las formulaciones, incluso la mezcla más débil (1:2:3) logró 13,9 kgf/cm², superando en cinco veces la resistencia de una mezcla similar sin arena. Este

comportamiento es consistente con la función estructural que cumple el agregado en los concretos, brindando rigidez y mejorando las propiedades mecánicas del compuesto (Cardinale et al., 2021). Por otro lado, Sánchez et al. (2018) reportaron un “ladrillo ecológico” a base de cemento, arena y papel reciclado que alcanzó 66,9 kgf/cm² de resistencia a la compresión, valor que ellos consideraron adecuado para fines constructivos. Dicho resultado es del mismo orden de magnitud que el obtenido con nuestra mezcla 1:1:1 (82,7 kgf/cm²) y confirma que mediante una combinación apropiada de papel reciclado con material cementante es posible lograr resistencias competitivas con las de ladrillos tradicionales. Las diferencias específicas entre distintos estudios pueden atribuirse a variaciones en las proporciones exactas, métodos de fabricación (por ejemplo, algunos trabajos premezclan pulpa de papel con agua y luego la añaden al cemento), tipo de curado y características del papel empleado (Sánchez et al., 2018). No obstante, la tendencia general indica que la inclusión de arena (u otro agregado mineral) y una dosificación balanceada son factores determinantes para obtener buenos resultados con papercrete.

Al comparar con investigaciones internacionales, hallamos coincidencias y contrastes interesantes. Kumar y Kansal (2016), en la India, elaboraron ladrillos con una proporción 1:1:3 (similar en razón nominal a una de nuestras formulaciones) y reportaron resistencias de hasta 116 kgf/cm², junto con un comportamiento de fractura dúctil. Esta resistencia es casi cuatro veces mayor que la obtenida en nuestro estudio para una proporción comparable (28,7 kgf/cm² en 1:1:3) y presenta una falla más plástica en lugar de frágil. La discrepancia puede deberse a la forma de expresar la proporción y a la cantidad real de papel: es posible que Kumar y Kansal trabajaran en proporciones en peso o utilizaran procesos de compactación distintos, resultando en una menor relación agua:cemento y menor porosidad. Además, la calidad del papel (periódico vs. bond) y otros aditivos podrían influir. Esto sugiere que todavía hay espacio para optimizar el proceso de fabricación de ladrillos de papel reciclado, por ejemplo, mediante prensado mecánico o el uso de aditivos que mejoren la adherencia fibra-matriz, con miras a alcanzar resistencias aún mayores sin sacrificar el carácter ecológico del material.

En conjunto, los datos de esta investigación, apoyados por literatura reciente, reafirman que la proporción de cemento:arena:papel = 1:1:1 representa un punto óptimo donde se equilibra la contribución resistente del cemento y la arena con los beneficios de aligeramiento y costo del papel reciclado, sin que este último comprometa la integridad mecánica del material. Mezclas con proporciones de papel superiores exhiben reducciones pronunciadas de resistencia, por lo que no

se recomiendan para fines estructurales. De hecho, estudios actuales señalan que el reemplazo del cemento por fibras celulósicas más allá de 10–15% conlleva pérdida de desempeño y requiere refuerzos adicionales o tratamientos especiales para compensar (Solahuddin & Yahaya, 2021). En nuestro contexto, la mezcla 1:1:1 contiene una cantidad de papel dentro de un rango manejable que permite cumplir e incluso exceder diversas exigencias normativas, lo que la hace atractiva como material de construcción sostenible.

Finalmente, en cuanto al cumplimiento normativo peruano, vale destacar que cuatro de las cinco formulaciones desarrolladas en el estudio cumplen la resistencia mínima para muros no portantes ($\geq 20 \text{ kgf/cm}^2$ según E.070), lo cual es un resultado prometedor. En particular, la mezcla 1:1:1 no solo supera esa meta básica, sino que excede holgadamente los requisitos para elementos portantes, incluyendo ladrillos tipo II de alta resistencia (MVCS, 2016). Esto implica que ladrillos confeccionados con papel reciclado pueden, bajo ciertas dosificaciones, igualar o sobrepasar el desempeño de ladrillos cerámicos convencionales de alta calidad. Un aspecto a considerar en futuros trabajos es la durabilidad de estos ladrillos de papel a largo plazo: si bien su resistencia inicial es adecuada, sería importante investigar su comportamiento ante la absorción de agua, ciclos de humedad-secado, ataque de microorganismos o fuego, entre otros factores. Experimentos complementarios señalan que la absorción de agua aumenta con mayores contenidos de papel (Solahuddin & Yahaya, 2021), por lo que podría requerirse sellar o proteger superficialmente los ladrillos en aplicaciones expuestas a la intemperie. Adicionalmente, la inclusión de aditivos hidrorrepelentes o fibras complementarias (por ejemplo, fibras de vidrio como explorado por Selvarasan & Bharathidasan, 2017) podría mejorar ciertas propiedades sin degradar la resistencia, siendo este un campo abierto para la innovación en materiales compuestos ecológicos.

Conclusiones

Se determinó que la proporción 1:1:1 (cemento:arena:papel bond reciclado) es la óptima para la elaboración de ladrillos ecológicos no portantes a base de papel reciclado. Esta mezcla logró la mayor resistencia a la compresión ($82,7 \text{ kgf/cm}^2$) y superó todos los requisitos mínimos estipulados en la normativa peruana aplicable: sobrepasó la resistencia exigida por la norma E.080 para adobes ($10,2 \text{ kgf/cm}^2$) y también las de la norma E.070, tanto para bloques de muros no portantes (20 kgf/cm^2) como para muros portantes y ladrillos cerámicos tipo I y II (50 y 70 kgf/cm^2 , respectivamente). En otras palabras, la mezcla 1:1:1 produjo ladrillos cuya resistencia excede

incluso los valores mínimos exigidos para unidades de albañilería estructural de alta calidad, lo que indica un desempeño sobresaliente.

Cuatro de las cinco proporciones evaluadas (1:1:1, 1:1:2, 1:1:3 y 1:2:2) resultaron aptas para su uso en muros no portantes al satisfacer el criterio de resistencia $\geq 20 \text{ kgf/cm}^2$ (MVCS, 2016). Sin embargo, únicamente la proporción 1:1:1 logró resistencias suficientes para ser considerada en elementos portantes o muros con cargas. Por tanto, se recomienda emplear preferiblemente la dosificación 1:1:1 cuando se busque maximizar la capacidad resistente del ladrillo de papel reciclado, especialmente si se contempla su uso en aplicaciones estructurales ligeras. Las otras formulaciones podrían utilizarse en tabiques o divisiones interiores donde las exigencias mecánicas sean menores, teniendo precaución de no usar la mezcla 1:2:3, ya que, aunque supera la resistencia del adobe, queda por debajo del estándar para bloques no portantes y presenta un estrecho margen de seguridad respecto al requisito normativo.

La comparación con estudios previos evidencia que la inclusión de un agregado fino (arena) en la mezcla es crucial para obtener resistencias mecánicas aceptables. Todas las mezclas de este estudio superaron ampliamente la resistencia de materiales similares fabricados sin arena (como concretos de papel reportados en la bibliografía con resistencias de solo 3–5 kgf/cm^2 cuando solo combinan cemento y papel) gracias a la acción de la arena como refuerzo particulado. En consecuencia, para futuros desarrollos de papercrete se recomienda mantener un porcentaje adecuado de árido mineral en la mezcla, ya sea arena u otro material granular, a fin de garantizar una matriz densa y resistente. La fabricación de ladrillos con papel bond reciclado presenta claras ventajas ambientales y económicas. Se reutiliza un residuo abundante (papel de oficina desechado), contribuyendo a disminuir la contaminación y la necesidad de disposición en rellenos sanitarios. Al mismo tiempo, se reduce la proporción de cemento necesaria en la mezcla, lo que implica menor emisión de CO_2 asociada a la producción de cemento (un beneficio ambiental importante) y un menor costo de materiales. Estudios recientes en distintos países respaldan que los eco-ladrillos de papel pueden producirse a bajo costo y con un desempeño adecuado para vivienda de interés social (Qureshi et al., 2021; Solahuddin & Yahaya, 2021). Nuestros resultados refuerzan esta noción al demostrar que es posible cumplir con las normas técnicas utilizando este material alternativo. Por tanto, se vislumbra una viabilidad práctica en la adopción de ladrillos de papel reciclado para construcciones de bajo costo, especialmente en muros divisorios y edificaciones de uno a dos niveles, contribuyendo a la construcción sostenible y a la economía circular en el sector.

Si bien la resistencia estructural del ladrillo de papel 1:1:1 es destacable, sugerimos profundizar en la investigación de otras propiedades relevantes antes de su implementación masiva. Aspectos como la absorción de agua y la durabilidad frente a la intemperie deben ser estudiados a detalle. Es recomendable evaluar tratamientos hidrofugantes para reducir la absorción, así como estudiar el comportamiento del material ante fuego, considerando que contiene un alto porcentaje de celulosa (aunque cabe anotar que ciertos estudios han señalado un buen desempeño térmico y de resistencia al fuego en mezclas con papel, debido a la baja conductividad y la protección que el material cementicio proporciona a las fibras) (Qureshi et al., 2021). Asimismo, investigar la compatibilidad de estos ladrillos con morteros de pega convencionales y su desempeño en muros completos bajo carga lateral (sismo) sería el siguiente paso lógico para asegurar su uso seguro en edificaciones. En resumen, la presente investigación confirma el potencial de los ladrillos en base a papel bond reciclado como alternativa ecológica para la construcción, particularmente en muros no portantes, siempre que se utilice una dosificación adecuada como la determinada (1:1:1). De esta manera, se contribuye al desarrollo de materiales de construcción sostenibles, alineados con las tendencias actuales de economía circular y reducción de la huella ambiental en la industria de la construcción.

Referencias

- Amores, M. (2013). El papel reciclado de los desechos sólidos urbanos del cantón Ambato, provincia de Tungurahua y su incidencia en la resistencia del hormigón [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio UTA. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/4334>
- Arya, R., & Kansal, R. (2016). Utilization of waste papers to produce ecofriendly bricks. *International Journal of Science and Research*, 5(8), 92-96. <https://doi.org/10.21275/art2016792>
- Barriga, E., & Bernardo, J. (2016). Aplicación y estudio de las propiedades de las celulosas recicladas obtenidas del papel periódico como una adición para el concreto [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio UPC. <http://hdl.handle.net/10757/621704>
- Bustillo Revuelta, M., & Calvo Sorando, J. P. (2005). *Materiales de construcción*. Fuego Editores.
- Campodónico, J. (2002). Análisis del reciclaje de papel y cartón en la ciudad de Chiclayo [Tesis de pregrado, Universidad de Piura]. Repositorio UDEP. <https://hdl.handle.net/11042/1459>
- Cando. (s.f.). *Cemento Portland usos y tipos*. Bloques Cando. <https://bloquescando.com/cemento-portland-usos-y-tipos/>
- Cardinale, T., D'Amato, M., Sulla, R., & Cardinale, N. (2021). Mechanical and physical characterization of papercrete as new eco-friendly construction material. *Applied Sciences*, 11(3), 1011. <https://doi.org/10.3390/app11031011>
- Cortez Prieto, M. H., & Lozano Surco, C. O. (2021). Evaluación de la resistencia a la compresión de ladrillos de concreto agregando papel reciclado [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/87053>
- Delcassee, M. M., Rahul, V., Abhilash, C., Pavan, M. K., & Gangadhar. (2017). Papercrete bricks - An alternative sustainable building material. *International Journal of Engineering Research and Application*, 7(3, Pt. 6), 9-14. <https://doi.org/10.9790/9622-0703060914>
- Díaz Martínez, F. (2005). Análisis experimental de la contracción por secado en mezclas de concreto hidráulico [Tesis de licenciatura, Universidad de las Américas Puebla]. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/diaz_m_f/
- EcuRed. (s.f.). *Arena*. EcuRed. <https://www.ecured.cu/Arena>

- Elizalde, L. (2005). Caracterización de mezclas de mortero a base de celulosa. Papel reciclado para fabricación de elementos constructivos [Tesis de maestría, Tecnológico de Monterrey]. <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/567152>
- Gutiérrez de López, L. (2003). El concreto y otros materiales para la construcción. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9302>
- IngePlan. (2014). Proyecto de urbanización de vial y puente del ámbito A-8-7-7 Ibarra-San Pío, Elorrio. http://www.elorrio.eus/es-ES/Ayuntamiento/Perfil-Contratante/2014%20Proyecto%20de%20urbanizacion%20del%20vial%20y%20puente/P1201_PPTP_202_V03.pdf
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2004). Propiedades del concreto. Conceptos básicos del concreto. <http://www.imcyc.com/cyt/julio04/CONCEPTOS.pdf>
- Manoj, M., & Uma, G. (2017). Papercrete. International Journal of Science, Engineering and Technology Research, 6(8), 1289-1297. <http://ijsetr.org/wp-content/uploads/2017/08/IJSETR-VOL-6-ISSUE-8-1289-1297.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2016). Norma técnica E.070: Albañilería. <https://www.cip.org.pe/publicaciones/2021/enero/portal/e.070-alba-ileria-sencico.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2017). Norma técnica E.080: Diseño y construcción con tierra reforzada. https://cdn-web.construccion.org/normas/rne2012/rne2006/files/titulo3/02_E/E_080.pdf
- Moreno, L., & Ponce, K. (2017). Características físicas y mecánicas de la unidad de albañilería ecológica a base de papel reciclado en la ciudad de Trujillo [Tesis de pregrado, Universidad Privada Antenor Orrego]. Repositorio UPAO. <https://hdl.handle.net/20.500.12759/3593>
- Polanco Rodríguez, A. (s.f.). Manual de prácticas de laboratorio de concreto. Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ingeniería.
- Prieto Jiménez, S. (2016). Panel prefabricado de hormigón aliviano a base de papel periódico y cartón reciclado, destinado a vivienda de interés social. Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca, 3(5), 51-61. <https://doi.org/10.18537/est.v003.n005.06>
- Qureshi, M. M. M. N., Chandio, S. A., Memon, A. A., & Memon, A. H. (2021). Effective utilization of waste paper into bricks/papercrete wall panels. IARJSET, 8(4), 23-26. <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2021.8404>

- Santamaria, J., Fuller, B., & Fafitis, A. (2007). Structural properties of a new material made of waste paper. In *Computational methods and experimental measurements XIII* (pp. 557-563). WIT Press. <https://doi.org/10.2495/CMEM070561>
- Sánchez, J., Guerrero, F., Cerna, R., & Gonzales, K. (2018). Ladrillo ecológico elaborado con papel reciclado: Costo y propiedades físico-mecánicas. *Conocimiento para el desarrollo*, 9(2), 29-34. <https://revista.usanpedro.edu.pe/index.php/CPD/article/view/339>
- Selvarasan, P., & Bharathidasan, S. (2017). Experimental investigation of papercrete with glass fibre as a partial replacement for fine aggregate. *International Research Journal in Advanced Engineering and Technology*, 3(3), 2199-2215. <http://www.irjaet.com/Volume3-Issue-3/paper1.pdf>
- Solahuddin, B. A., & Yahaya, F. M. (2021). Effect of shredded waste paper on properties of concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 682(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/682/1/012006>
- Valero Lozano, A. J., Vargas Vargas, N. R., & Vargas, Y. A. (2015). Ecobrick ladrillo ecológico a base de papel reciclado para muros divisorios [Proyecto de grado, Universidad La Gran Colombia]. <https://repository.ugc.edu.co/server/api/core/bitstreams/9c908a49-7408-4afb-b49b-834f1c47aa47/content>